

О КИНЕТИЧЕСКОМ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ МЕТОДАХ ИЗМЕНЕНИЯ ОРБИТ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

М. Д. Сизова, Б. М. Шустов

Институт астрономии РАН

Рассмотрена эффективность кинетического и энергетического методов изменения орбит опасных небесных тел. Кинетический метод эффективнее, но для пучковых устройств подбор глубины выделения энергии (в пике Брегга) может повысить эффективность энергетического метода.

ON KINETIC AND ENERGETIC APPROACHES TO CHANGE ORBITS OF CELESTIAL BODIES

M. D. Sizova, B. M. Shustov

Institute of astronomy RAS

Efficiencies of the kinetic and energy approaches to change orbits of dangerous celestial bodies is considered. Kinetic method is more effective. For beam devices an adjusting of the depth of energy release (in the Bragg peak) can increase effectiveness of the energy approach.

В последние годы, когда все возрастающее внимание в мире уделяется проблеме астероидно-кометной опасности, внимание экспертов привлекают методы изменения орбит опасных небесных тел (ОНТ). Мы сравниваем кинетический метод (использование ударника) с энергетическим подходом, когда ударника нет, а энергия (излучения или частиц) выделяется в веществе ОНТ.

Обозначим массу и скорость (в системе отсчета ОНТ) ударника как m и v , массу ОНТ как M , а изменение скорости ОНТ после удара ΔV . При выбросе массы из ОНТ этому телу может передаваться импульс, существенно превышающий vm . Для оценки превышения используют коэффициент усиления (multiplication factor) β [1]. В связи с реализацией проекта AIDA [2] исследования возможностей увеличения β приобрели особое значение. Увеличение β при высокоскоростном ударе обусловлено тем, что мишени передается не только импульс ударника, но и доля α кинетической энергии ударника E_k идет на выброс вещества мишени. Если обозначить массу выброса $m_{\text{выбр}}$, а его скорость $v_{\text{выбр}}$, то $v_{\text{выбр}} = v\sqrt{\frac{\alpha m}{m_{\text{выбр}}}}$. Если предположить, что $v_{\text{выбр}}$ направлена «навстречу» ударнику, то фактор

$\beta = \sqrt{\left(\frac{\alpha m_{\text{выбр}}}{m}\right)} + 1$ или $\beta = \frac{\alpha v}{m_{\text{выбр}}} + 1$. Очевидно, что максимальное значение β достигается при наибольших значениях $m_{\text{выбр}}$ и наименьших (но обеспечивающих выброс из системы) значениях $v_{\text{выбр}}$. Ряд лабораторных экспериментов и расчетов показывают, что при скоростях ударника ~ 10 км/с типичные скорости выброса составляют не более нескольких десятков метров в секунду, а значение отношения $\frac{m_{\text{выбр}}}{m} \leq 1000$. Это приводит к значениям β в несколько десятков (более реалистичные оценки $\beta < 10$) [3]). В энергетическом подходе в мишень доставляется энергия E_k , при этом импульсом излучения или пучка частиц можно пренебречь. Пусть α — доля энергии E_k , идущая на выброс (испарение) вещества мишени. Скорости разлета испаряемого вещества $v_{\text{выбр_э}}$ составляют от сотен метров до единиц километров в секунду. Импульс, передаваемый ОНТ, будет $\frac{2\alpha}{v_{\text{выбр_э}}}$. Отношение импульсов, передаваемых мишени в кинетическом (к) и энергетическом (э) подходах, будет

$$\varepsilon = 2\alpha E_{\text{э}} \frac{v_{\text{выбр_к}}}{v_{\text{выбр_э}}} \frac{1}{(2\alpha E_k + mvv_{\text{выбр_к}})}.$$

Если принять $E_{\text{э}} = E_k$, то очевидно, что при $v_{\text{выбр_к}} < v_{\text{выбр_э}}$ ε всегда меньше единицы. То есть кинетический подход при равных энергозатратах более выгоден. Повысить эффективность энергетического подхода можно, увеличивая $E_{\text{э}}$ или используя методы заглубленного выделения энергии. Эксперты из ИЯФ СО РАН предложили использовать зависимость потери энергии частицы от глубины проникновения в вещество. Для альфа-частиц и других ионов кривая зависимости имеет выраженный пик (пик Брегга) незадолго до остановки частицы. Выделение энергии пучка частиц происходит на некоторой глубине (зависящей от материала мишени и типа ионов).

Библиографические ссылки

1. *Holsapple K. A., Housen K. R.* Momentum transfer in asteroid impacts. I. Theory and scaling // *Icarus*. — 2012. — Vol. 221. — P. 875—887.
2. *Cheng A. F., Rivkin A. S., Michel P. et al.* AIDA DART asteroid deflection test: Planetary defense and science objectives // *Planetary and Space Science*. — 2018. — Vol. 157. — P. 104—115.
3. *Bruck Syal M., Michael Owen J., Miller P. L.* Deflection by kinetic impact: Sensitivity to asteroid properties // *Icarus*. — 2016. — Vol. 269. — P. 50—61.